



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Tainá Varela de Melo

Concretos de elevada ecoeficiência produzidos com finos de escória de aciaria

Ouro Preto

2018

Tainá Varela de Melo

Concretos de elevada ecoeficiência produzidos com finos de escória de aciaria

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto
Orientador: Prof. M.Sc. José Maria Franco de Carvalho

Ouro Preto

2018

Tainá Varela de Melo

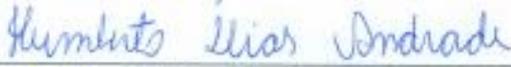
Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 19 de julho de 2018 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil. Banca examinadora:



Orientador: Prof. M.Sc. José Maria Franco de Carvalho – UFV



Orientador: Prof. D.Sc. Ricardo André Fiorotti Peixoto - UFOP



Membro: Prof. M.Sc. Humberto Dias Andrade – UFOP

[ESPAÇO PARA FICHA CATALOGRÁFICA]

RESUMO

Levando em consideração a crescente preocupação com as questões ambientais e implicações econômicas e legais no que se refere à aspectos de sustentabilidade e eficiência de processos, a busca por parte dos segmentos industriais de um adequado gerenciamento de seus resíduos tem impulsionado pesquisadores na busca por soluções. A indústria do aço se destaca pela quantidade e características de suas escórias. As escórias de aciaria são materiais inorgânicos ricos em Ca, Si e Fe, na forma de silicatos e óxidos, com características que apresentam certas similaridades com matérias primas utilizadas pela indústria da construção civil. Esta última, por sua vez, se destaca pela elevada demanda de materiais naturais e de baixo custo e apresenta grande potencial de absorção de rejeitos reciclados, com destaque na aplicação destes em matrizes cimentícias, desde que critérios de competência mecânica e durabilidade sejam atendidos. A utilização de escórias de aciaria em matrizes cimentícias como agregados ou mesmo finos vem sendo estudada por diversos autores com bastante sucesso. O presente trabalho apresenta um estudo envolvendo produção de concretos de alta resistência mecânica com substituição parcial de cimento por dois finos produzidos com escória de aciaria, obtidos por dois processos de moagem: convencional e de alta eficiência. Os teores de substituição aplicados foram de 0% a 60% e os resultados mostraram que foi possível alcançar resistências muito elevadas (em muitos casos bastante superiores à do concreto de referência) com consumos reduzidos de cimento, implicando a uma alta ecoeficiência, redução de custo, elevado consumo de material reciclado e redução de impactos causados pela produção do cimento.

Palavras chave: Finos de escória de aciaria, concreto de alta resistência, reciclagem de rejeitos industriais, escória de aciaria

ABSTRACT

Taking into account the growing concern with environmental issues and economic and legal implications regarding aspects of sustainability and efficiency of processes, the search by industrial segments for an adequate management of their waste has driven researchers in the search for solutions. The steel industry stands out for the quantity and characteristics of its slag. Steel slag are inorganic materials rich in Ca, Si and Fe, in the form of silicates and oxides, with characteristics that have certain similarities with raw materials used by the construction industry. The latter, in turn, is highlighted by the high demand for natural materials and low cost and presents great potential for absorption of recycled waste, with emphasis on the application of these in cement matrix, provided that criteria of mechanical competence and durability are met. The use of steel slag in cementitious matrixes such as aggregates or even fines has been studied by several authors with great success. The present work presents a study involving the production of high mechanical strength concrete with partial replacement of cement by two fines produced with steel slag obtained by two milling processes: conventional and high efficiency. The substitution rates applied were 0% to 60% and the results showed that it was possible to achieve very high resistances (in many cases much higher than the reference concrete) with reduced consumption of cement, implying a high ecoefficiency, cost reduction, high consumption of recycled material and reduction of impacts caused by cement production.

Key words: Slag thin steel, high strength mortar, recycling of industrial waste, steel slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emissões de gases de efeito estufa da indústria de cimento, 2000	6
Figura 2. Distribuição granulométrica dos finos utilizados na pesquisa	23
Figura 3. Resultados dos ensaios de viscosidade e dosagem de aditivo	24
Figura 4. Resultados dos ensaios de empacotamento	25
Figura 5. Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos estudados.....	26
Figura 6. Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos estudados	27
Figura 7. Resultados dos ensaios de determinação da massa específica dos concretos estudados	28
Figura 8. Resultados dos ensaios de absorção de água dos concretos estudados	28
Figura 9. Resultados dos ensaios de índice de vazios dos concretos estudados	29
Figura 10. Imagens da seção transversal cortada e polida de corpos de prova produzidos com algumas argamassas estudadas: (a) concreto de referência; (b) concreto ELD 00-90-10; (c) concreto ELD 00-80-20; (d) concreto ELD 40-40-20.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado.....	16
Tabela 2. Configuração do moinho de bolas empregado na pesquisa	17
Tabela 3. Configuração do moinho de alta eficiência empregado na pesquisa ..	18
Tabela 4. Traços produzidos na pesquisa com percentuais em volume dos materiais constituintes.....	19
Tabela 5 – Características físicas dos agregados empregados na pesquisa	21
Tabela 6. Resultados da análise química das escórias estudadas.....	22
Tabela 7. Parâmetros granulométricos dos finos estudados	23
Tabela 8. Avaliação da ecoeficiência dos concretos estudados	31

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Corpo-de- Prova

EA – Escória de Aciaria

IAB – Instituto Aço Brasil

LD – Linz-Donawitz

AE – Arco Elétrico

RSI – Resíduo Sólido Industrial

MA – Módulo de Alumina

CAD – Concreto de Alto Desempenho

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRATC.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE SIGLAS	IX
SUMÁRIO	X
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Questão ambiental.....	5
2.2 Cimento Portland	5
2.3 Reaproveitamento de Resíduos Industriais Siderúrgicos	7
2.3.1 Escória de Aciaria	8
2.3.2 Geração, destinação e gerenciamento	9
2.3.3 Utilização na construção civil	11
2.4 Concretos de elevada resistência.....	12
2.4.1 Técnicas de obtenção	13
2.4.2 Aditivos.....	13

2.4.3	Dosagem de aditivo	14
2.4.4	Empacotamento	15
3	Materiais e Métodos	16
3.1	Materiais	16
3.2	Métodos	17
3.2.1	Produção dos fílers	17
3.2.2	Caracterização química das escórias	18
3.2.3	Caracterização granulométrica dos fílers	18
3.2.4	Projeto dos traços dos concretos parametrizados	18
3.2.5	Dosagem do superplastificante	19
3.2.6	Obtenção da condição de máximo empacotamento das misturas ..	20
3.2.7	Caracterização física e mecânica dos concretos	20
3.2.8	Avaliação da ecoeficiência dos concretos	20
4	Resultados e discussão	20
4.1	Caracterização física dos agregados convencionais e reciclados	20
4.2	Caracterização química das escórias	21
4.3	Granulometria dos fílers de escória	22
4.4	Dosagem do superplastificante	24
4.5	Grau de empacotamento e determinação da relação água / finos dos concretos	25
4.6	Caracterização mecânica dos concretos	25
4.7	Caracterização física dos concretos	27
4.8	Avaliação da Ecoeficiência	30
5	Conclusão	31

6	Referências	33
---	-------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com questões ambientais e a sustentabilidade na cadeia que envolve a construção civil é crescente, aumentando a busca por soluções que reduzam os impactos ambientais, o consumo de recursos naturais e energéticos. Essas soluções, muitas vezes, representam ainda vantagens econômicas (GUMIERI, 2002; GONÇALVES, FONTES, *et al.*, 2016).

A construção civil é uma das atividades industriais que mais consomem recursos naturais e representam uma parcela importante da economia brasileira, no entanto, cabe ressaltar que os recursos vêm se tornando escassos, principalmente em grandes centros urbanos, tornando as matérias primas mais escassas e caras, uma vez que há custos cada vez maiores associados a transporte de materiais vindos de outras regiões (GONÇALVES, FONTES, *et al.*, 2016).

Por outro lado, a atividade industrial crescente enfrenta pressões para promover uma adequada disposição dos resíduos gerados, seja por limitação de área e custo para disposição dos resíduos, seja por pressões ambientais e legais (MELO, 2008; JURAS, 2015). Dentre as atividades industriais geradoras de resíduos destaca-se a indústria do aço, que produz vários tipos de escórias ao longo da cadeia produtiva, dependendo dos seus processos. Algumas dessas escórias apresentam propriedades adequadas para a sua utilização na produção de cimentos e como agregados para a construção civil, outras precisam de processos adicionais para sua adequação, como é o caso da escória de aciaria (TRIPATHI e CHAUDHARY, 2016; IAB, 2015).

A reciclagem é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesa em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, de redução das despesas de deposição (GUMIERI, 2002). A empresa que investe em pesquisas que trabalham as etapas e processos de geração e reciclagem de seus resíduos, elimina despesas com gerenciamento, cria novas oportunidades de negócios, proporciona indireta ou diretamente a redução da extração de matéria prima preservando assim os recursos naturais limitados (GONÇALVES, FONTES, *et al.*, 2016).

Os centros de pesquisa têm investido recursos na busca de alternativas economicamente viáveis e tecnicamente adequadas para a utilização dos rejeitos industriais na construção civil, o que, por um lado atende uma crescente necessidade das indústrias em promover uma adequada disposição para seus subprodutos e por outro, uma necessidade do setor da construção civil de obter materiais tecnicamente adequados e disponíveis a baixo custo em substituição a recursos cada vez mais escassos e caros.

JOHN (1996) apresenta um esboço de metodologia para pesquisa e desenvolvimento de reciclagem de resíduos om materiais de construção civil que envolve: caracterização física e química e da microestrutura do resíduo, incluindo o seu risco ambiental; busca de possíveis aplicações dentro da construção civil, considerando as características do resíduo; desenvolvimento de diferentes aplicações, incluindo seu processo de produção; análise de desempenho frente as diferentes necessidades dos usuários para cada aplicação específica; análise do impacto ambiental do novo produto, em uma abordagem *cradle to grave*, que necessariamente deve envolver avaliação de riscos à saúde dos trabalhadores e usuários.

A indústria do aço envolve a produção de diferentes escórias ao longo dos processos, dentre elas algumas apresentam um mercado já consolidado, como exemplo a escória de alto forno, largamente utilizada na produção de cimento (IAB, 2015). A escória de aciaria, no entanto, originada no processo de refino para a produção de aço, demanda tratamentos adicionais para promover a estabilização de compostos expansivos, sendo eles a fração de ferro metálico e os óxidos de cálcio e magnésio. Dessa forma, processos como separação da fração magnética e intemperização são aplicáveis para tornar o material adequado para aplicação em matrizes cimentícias (DINIZ, FRANCO DE CARVALHO, *et al.*, 2017).

Vários estudos de utilização de escória de aciaria como materiais de construção têm sido desenvolvidos por diversos autores com resultados satisfatórios, destacando-se a aplicação deste material como agregados em substituição à areia e pedra britada em concretos e como material cimentício suplementar como substituto

parcial do cimento (MASURERO, VILELA e DAL MOLIN, 2000; PEIXOTO, OLIVEIRA, *et al.*, 2008; ZHANG, YU, *et al.*, 2011; DINIZ, FRANCO DE CARVALHO, *et al.*, 2017).

No presente trabalho é apresentado um estudo de utilização de finos de escória de aciaria em substituição parcial do cimento, na produção de concretos de elevada ecoeficiência, envolvendo todos os procedimentos de caracterização das matérias primas, produção dos finos de escória, dosagem, produção de protótipos de concretos e caracterização física e mecânica destes. Os resultados encontrados mostraram que foi possível obter matrizes excepcionalmente resistentes e coesas, o que representa um achado muito significativo na promoção desse resíduo industrial como material de construção e na produção de concretos de qualidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Produção e avaliação física e mecânica de concretos de elevada ecoeficiência sem agregado graúdo, produzidos com substituição parcial de cimento por finos de escória de aciaria.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Obtenção e caracterização dos materiais empregados na pesquisa, sendo eles (a) um cimento Portland de alta resistência inicial; (b) agregados convencionais utilizados na produção de concretos; e (c) duas escórias de aciaria, sendo uma do tipo LD e outra do tipo AE.
- ii. Produção dos finos de escória de aciaria por meio de moagem convencional e moagem de alta eficiência.
- iii. Elaboração de traços de concretos de alta resistência compostas por cimento, finos de escória de aciaria e areia convencional, sem uso de agregado graúdo e com taxas de substituição de cimento por finos de escória variando entre 10% e 60%.
- iv. Obtenção dos teores ótimos de aditivo para a produção dos concretos com o mínimo consumo de água.

- v. Obtenção dos consumos ótimos de água para produção dos concretos densamente empacotadas.
- vi. Obtenção das resistências à tração na flexão e compressão dos concretos estudadas por meio da produção de corpos de prova e rompimento destes com idades de 7 e 28 dias.
- vii. Obtenção das principais propriedades físicas dos concretos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Questão ambiental

A elevada necessidade de consumo de matéria prima faz com que a construção civil seja considerada um dos setores que mais provocam impacto ambiental. Por esse motivo, visando à preservação do meio ambiente e pressionado pelas legislações ambientais, as indústrias vêm buscando um êxito em larga escala no que compete ao uso sustentável de recursos naturais.

De acordo com o estudo realizado por JOHN (2000), o consumo de agregado para argamassa e concreto no Brasil é cerca de 210 milhões de toneladas por ano. O que incita a afirmação de que a geração de resíduos é a principal fonte de degradação do meio ambiente. Segundo JOHN (1996), a definição de Resíduos pode ser dada por: produtos provenientes de um processo de produção ou consumo de um determinado produto, sem estar vinculado ao seu valor comercial.

De acordo com o IABr (2014) a indústria siderúrgica gera cerca de 600kg de resíduos por tonelada de aço produzido. Grande parte desses resíduos é obtida na etapa de refino do ferro gusa, durante o processo de produção do aço, e é denominada escória de aciaria. Já a indústria da construção civil tem potencializado o consumo de recursos naturais para a elaboração de argamassas e concretos, tal ação vem aumentando ainda mais a escassez desses recursos naturais. Baseando-se nesses aspectos, a indústria siderúrgica e da construção civil se destacam no âmbito da degradação ambiental.

2.2 Cimento Portland

Atualmente, o processo de fabricação de cimento Portland no Brasil é realizado de acordo com as especificações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dessa forma, produto final é analisado de diversas formas, a ponto que seja alcançada a composição química almejada, e sejam atendidos os requisitos de qualidade nacionais (KIHARA e MARCIANO JR., 1995).

A indústria do cimento é responsável por cerca de 5% das emissões mundiais de CO₂ e por aproximadamente 3% das emissões de gases do efeito estufa. A Figura 1 indicada abaixo, mostra que a queima de combustíveis fósseis representa aproximadamente 54%, o desmatamento proveniente das queimadas 9% e outros emissores de gases de efeito estufa, 14,8%. Já nas emissões específicas provenientes da indústria do cimento, cerca de 50% corresponde ao processo produtivo, aproximadamente 40% à queima de combustíveis fósseis, 5% ao uso da eletricidade e 5% referentes ao transporte (MAURY e BLUMENSCHNEIN, 2012).

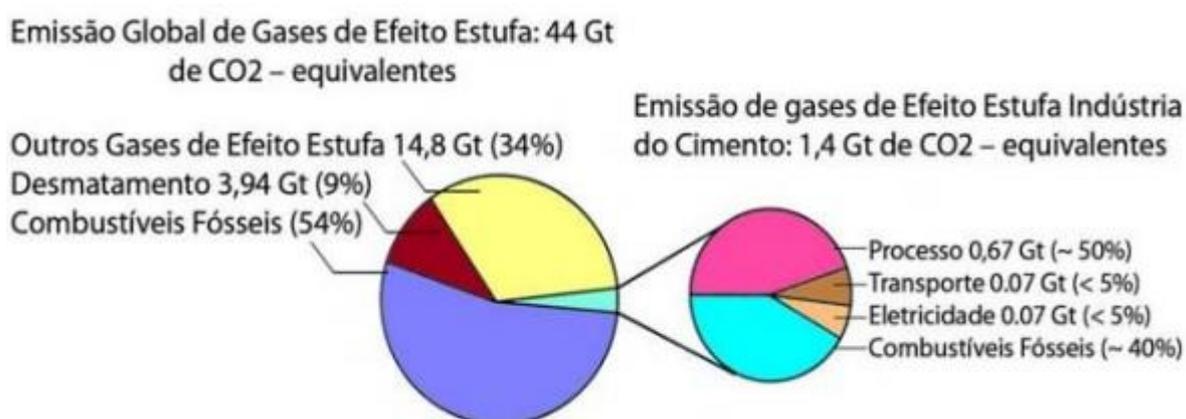


Figura 1. Emissões de gases de efeito estufa da indústria de cimento, 2000

Fonte: MAURY & BLUMENSCHNEIN (2012)

O processo de fabricação do cimento Portland inicia-se na extração de calcário e argila. Posteriormente ao processo de lavra, o calcário é britado afim de atingir dimensões adequadas para o tratamento industrial. Não é realizado o processo de britagem na argila, já que a mesma é suficientemente fina, e só se faz necessário sua homogeneização.

Em seguida é realizada a pré-homogeneização da argila, calcário e outros aditivos e armazenados em depósitos próprios. A dosagem dos referidos materiais é baseada em parâmetros químicos pré-estabelecidos, que estão diretamente relacionados às suas características composicionais. Dessa forma obtêm-se a denominada farinha, que se trata do material fino e com concentrações homogêneas.

A modificação físico-química da farinha em clínquer percorre quatro etapas: preaquecimento, calcinação, clinquerização e resfriamento. Na etapa de calcinação, a matéria prima é submetida a uma temperatura aproximada de 800°C (CENTURIONE, 1993).

Após a modificação, inicia-se a reação de descarbonatação do calcário e a fragmentação da estrutura molecular das matérias-primas, seguindo para o forno rotativo, local onde a chama do maçarico principal atinge altas temperaturas. Posteriormente, um resfriador promove a diminuição da temperatura de 1450°C para 80°C aproximadamente (ABCP, 2012). Dessa forma, na etapa de resfriamento, a clinquerização é completada, de modo que uma série de reações químicas influenciarão na estabilidade química, calor de hidratação, início de pega e na resistência mecânica do concreto nas primeiras idades.

Quando o clínquer passa pelo processo de resfriamento, é adicionado sulfato de cálcio, que atua como um retardador de pega do cimento, variando de 2 a 4% em sua quantidade (REHAN e NEHDI, 2005). De acordo com o tipo de cimento, pode haver outras adições, como: escória siderúrgica, materiais pozolânicos, filler calcário e cinzas volantes.

Por fim, o cimento consequente da moagem do clínquer e outras adições é conduzido para os depósitos de cimento, onde é estocado. Posteriormente a realização dos últimos ensaios de qualidade, o referente produto é encaminhado para expedição

2.3 Reaproveitamento de Resíduos Industriais Siderúrgicos

O Brasil produziu em 2014 cerca de 33,9 milhões de toneladas de aço bruto, o que correspondeu 52% da produção latino-americana e 2% da produção mundial do setor (IABR, 2014). Concomitante a esse fato, foram gerados cerca de 19 milhões de toneladas de rejeito siderúrgico, sendo que 60% desses referem-se as escórias de aciaria.

A cada tonelada de aço bruto produzido, são gerados 600 Kg de resíduos, sendo 25% desses constituídos por escória de aciaria. No Brasil, a disposição dessa

escória atinge cerca de R\$ 34 milhões/ano, o que representa um custo significativo para as siderúrgicas (IABR, 2014).

No momento que se incita a necessidade de processos e produtos inovadores, o aproveitamento da escória de aciaria na produção de matrizes cimentícias se mostra muito viável. Dessa forma, esse resíduo industrial deve ser encarado como um material, cuja significância implica diretamente na redução da emissão de CO₂ e em relação a matriz energética em geral (ABM, 2008).

Visando a garantia das características competitivas e sustentáveis da tecnologia atual, é primordial a continuidade da busca por processos mais adequados e no desenvolvimento da utilização de rejeitos, de modo a modificá-los em coprodutos. A ampliação do uso de escórias, principalmente como agregado tecnológico é de extrema importância (MOURA, GONÇALVES e LEITE, 2000).

2.3.1 Escória de Aciaria

A fabricação do aço pode ser dividida em 3 grupos quanto ao seu processo de refino: LD (Linz-Donawitz) que faz uso do conversor de oxigênio elétrico, OH (Open Heart) que utiliza o forno Siemens-Martin e EAF (Eletric Arc Furnace) que faz uso do forno de arco elétrico. De acordo com o IBS (2009), a produção de aço no Brasil, é aproximadamente de 80% pelo processo LD e cerca de 20% através do processo EAF e apenas 1,9% pelo forno Siemens-Martin.

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), norma que classifica os resíduos sólidos, a escória de aciaria é classificada como um resíduo da classe II – não inerte. Posteriormente a todo processo de fabricação do aço, a escória é acomodada em um recipiente adequado e é transportada até o pátio, onde é despejada em baias de resfriamento. Durante a etapa de resfriamento, ocorre a fragmentação da escória, que se dá devido ao choque térmico provocado pela aspensão de jatos de água. Em seguida ocorre o transporte desse material para ser estocado em pilhas nos pátios de beneficiamento, onde será processado. No processamento mais convencional, a escória é britada, peneirada, separada magneticamente da parte metálica existente e por fim estocada por faixa granulométrica em pilhas.

A escória é um resíduo de grande relevância gerada em elevadas quantidades durante o processo de produção do aço nos convertedores LD (RIZZO, 2006). Segundo o IBS (2008), o Brasil produziu em 2008 cerca de 30.106 toneladas de aço bruto através do processo de lingotamento e aciaria. Sendo que a cada tonelada de aço bruto produzido, são gerados de 70 a 170Kg de escória, e considerando uma média de 120Kg/t, observa-se uma geração de cerca 3600 toneladas de escória por ano.

2.3.2 Geração, destinação e gerenciamento

A escória de aciaria refere-se a um subproduto siderúrgico composto por óxidos básicos, provenientes da agregação de elementos que não constarão na composição do aço. As quantidades e tipos de óxidos que constam na escória de aciaria dependem diretamente da tipologia da matéria prima utilizada, do perfil do aço que se almeja obter, e até da característica do forno e seu revestimento (NASCIMENTO, 2007). Dentre os processos de fabricação do aço, destacam-se o Linz-Donawitz (LD) e do Arco Elétrico (EAF). O processo Linz-Donawitz é utilizado no refinamento do lingote de ferro, já o processo do arco elétrico é usado na produção do aço a partir da sucata.

De acordo com as informações do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, a Lei nº 13.305/2010 (IPEA, 2010a) estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, instituindo diretrizes, instrumentos, metas e ações a serem empregadas no país, tendo como objetivo a gestão incorporada e ao gerenciamento ambientalmente apropriado dos resíduos sólidos.

Dessa forma, dispositivos previstos na PNRS foram desenvolvidos, como “Plano de gestão em resíduos sólidos” e o “Plano Nacional de Resíduos Sólidos”, que proveio de uma ação do Ministério do Meio Ambiente, concomitante aos governos locais em prol da sustentabilidade.

Segundo a PNRS, a reciclagem não se refere a um tipo de tratamento, mas sim uma fase no gerenciamento e gestão dos resíduos sólidos – Artigo 9º da Lei nº 12.305/2010. Dessa forma, os projetos de reciclagem implicam na redução substancial da quantidade de resíduos a serem dispostos ou tratados e possibilitam o

restabelecimento de valores neles contidos, mesmo que suas limitações sejam ponderadas (IPEA, 2010a).

A viabilidade de uso de um resíduo não deve ser ponderada unicamente pelas suas características técnicas ao que se almeja, mas também na perspectiva do possível impacto ambiental que pode ser desencadeado, quando se analisa o contato entre o resíduo e um líquido. Parte de seus materiais constituintes podem se dissolver em pequena ou grande escala, sendo imprescindível saber o grau de dissolução de cada componente, individualmente. A lixiviação dos constituintes pode acontecer no local onde a escória está sendo alocada, pelas chuvas, pela infiltração natural das águas, etc (BALTAZAR, 2001).

Segundo Kalyoncu (2000), a utilização da escória de aciaria diminui de forma significativa as necessidades de consumo de recursos naturais não renováveis e primário, e concomitante a isso, seu uso implica na redução da quantidade de material a ser estocado em pilhas ou dispostos em aterros. Dessa forma, em alguns âmbitos, o uso da escória de aciaria promove benefícios ao meio ambiente, além de diminuir ou extinguir os custos vinculados à disposição desses resíduos sólidos.

A quantificação e destinação dos resíduos sólidos industriais, proveniente do processo siderúrgico, é realizada em conformidade e com a classificação proposta em condicionante da licença ambiental para a atividade do processo de fabricação do aço.

De acordo com a VDL Siderurgia (2012), no decorrer do beneficiamento da escória, os resíduos provindos das etapas são denominados “sucata metálica”, a qual é gerada em dimensões diversas. Tal sucata passa por um processo de recuperação e reenfundada, de forma que a escória, que é destinada ao reaproveitamento, é comercializada com indústrias de pré-moldados, indústrias cimenteiras, ou até mesmo doadas aos órgãos públicos locais.

A indústria siderúrgica gera uma quantidade significativa de resíduos, os quais apresentam inúmeros inconvenientes para serem descartados, tais como: necessidades de amplas áreas para descarte, agressão ao meio ambiente e, concomitante a isso, elevado custo para o preparo da área que receberá o rejeito, sendo esse custo variável entre R\$ 45,00 e R\$ 65,00 por tonelada de resíduo (MARCA AMBIENTAL, 2014).

Esses coprodutos já vem sendo uma opção concreta e relevante de fonte de receita para algumas empresas e, além de representar uma possibilidade de receita extra para as siderurgias, tais coprodutos também minimizam o custo para os clientes. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2014), a tonelada da brita custava em média em 2014 cerca de R\$ 54,00, enquanto a escória de aciaria aplicada como agregado artificial (pedriscos: escória de aciaria com diâmetros entre 4 e 10mm e areia: escória de aciaria com diâmetros entre 0 e 4mm) em substituição aos agregados naturais (brita natural e areia natural), era comercializada por R\$ 5,00 a tonelada.

2.3.3 Utilização na construção civil

A escória de aciaria beneficiada pode ser usada como matéria prima para inúmeros ramos industriais. Dentre esses ramos, destaca-se o seu uso como agregados para pavimentações e na construção civil. Tal reaproveitamento diminuirá o uso de recursos naturais, reduzindo o acúmulo de resíduos em pátios e incrementando o desenvolvimento regional e tecnológico, além de agregar valores para esse coproduto do processo siderúrgico (OLIVEIRA, PEIXOTO e ALVES, 2007).

O desenvolvimento tecnológico, a partir da utilização do resíduo industrial, escória de aciaria, como agregado no desenvolvimento de matrizes de cimento Portland indica uma opção de destinação ambientalmente adequada ao resíduo sólido proveniente das aciarias, com um custo acessível de manuseio e compra (GONÇALVES, 2015).

De acordo com Rizzo (2006) e Machado (2000), as escórias de aciaria podem ser usadas na construção civil em diversas modalidades, como:

- Utilização na forma de agregado no desenvolvimento do concreto, uma vez que esse coproduto possui uma considerável durabilidade e elevada resistência à abrasão e à compressão.
- Estabilizador de solos, por possuir rugosidade superficial elevada, índice de forma adequado, maior angulosidade, propiciar o aumento da resistência dos solos e maior resistência ao desgaste.

- Adição durante a produção de cimento, já que sua composição possui silicatos dicálcio e tricálcio, que é muito similar a composição química do clínquer utilizado na elaboração do cimento Portland.

2.4 Concretos de elevada resistência

Os concretos de alto desempenho (CAD) possuem várias características que os distinguem dos concretos usuais: alcançam resistências mecânicas muito superiores, podendo superar o valor de 100 MPa, maior durabilidade, já que possuem melhor desempenho quando expostos a ambientes potencialmente agressivos (THOMAZ, 2016). Dessa forma, o CAD inclui outros parâmetros além da resistência, como deformabilidade, trabalhabilidade e bombeabilidade (ROHDEN, 2012).

Geralmente o CAD é utilizado em elementos ou obras que requeiram alta resistência mecânica do concreto e/ou seções menores dos elementos estruturais. Essas estruturas incluem pontes, viadutos, edifícios muito altos, estruturas em ambientes potencialmente agressivos, obras hidráulicas, elementos pré-moldados e pisos industriais (THOMAZ, 2016).

De maneira geral, é possível identificar vários pontos positivos através da utilização do CAD, dentre elas: alta resistência ao desgaste ou abrasão, diminuição da porosidade e, conseqüentemente, diminuição da permeabilidade, baixas deformações (seja por deformação imediata, fluência ou retração), elevada fluidez na moldagem, elevadas resistências iniciais, redução das dimensões dos elementos estruturais e conseqüente diminuição do volume de concreto e na superfície de formas, baixas solicitações nas fundações, ausência de exsudação e excelente aderência a concretos já endurecidos (BACCIN, 1998).

Ainda que não tenha um consenso na literatura técnica, em geral, são denominados CAD os concretos cuja resistência à compressão é superior a 40 MPa e características que promovem diminuição da porosidade, boa durabilidade, resistência a cloretos e resistência à carbonatação. Entretanto Baccin (1998), conceitua o CAD como um concreto cujas propriedades ou características satisfazem a diversos critérios de desempenho.

2.4.1 Técnicas de obtenção

A princípio, os mesmos materiais empregados nos concretos de alto desempenho são os mesmos constituintes nos concretos convencionais. Entretanto, quando se almeja obter concretos com elevada resistência, faz-se necessário a diminuição brusca da relação água/cimento, tornando imprescindível o uso de aditivos (BACCIN, 1998).

Usualmente, o CAD, concreto de alto desempenho, é caracterizado por uma baixa relação água/cimento, que implica em maior durabilidade e propriedades mecânicas superiores. Contudo, o uso de uma relação água/cimento baixa compromete diretamente a trabalhabilidade (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Além disso, para aplicação, o concreto requer uma quantidade de água maior do que apenas para hidratação do cimento, o que provoca uma porosidade notória no concreto endurecido. Tal ação reduz potencialmente as suas propriedades mecânicas, facilitando a sua degradação. Através da adição de pequenas quantidades de aditivos, pode-se diminuir de forma significativa a quantidade de água requisitada para se alcançar a trabalhabilidade almejada e, concomitante, a diminuição da porosidade e aumentando a durabilidade do concreto (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

2.4.2 Aditivos

Segundo a ABNT NBR 11768:1992, os aditivos superplastificantes, também denominados aditivos minimizadores de água de alta eficiência pela norma americana ASTM C- 494/92 , são produtos que possuem características específicas que propiciam o aumento do índice de consistência do concreto, mantendo constante a quantidade de água da mistura, ou ainda, viabilizam a redução mínima de 12% da água de mistura na produção de um concreto cuja consistência já foi pré-estabelecida.

Dentre as vantagens de se utilizar aditivos químicos durante a produção do concreto, destaca-se a alta trabalhabilidade, característica que facilita a manipulação, adensamento, aplicação do material e a produção de concretos de elevado desempenho com um consumo menor de água, boa durabilidade e elevada

resistência. Desta forma, os aditivos superplastificantes incrementam de forma positiva as propriedades do concreto nas idades iniciais, sem desencadear qualquer efeito danoso para os tempos mais longos, sobretudo quando utilizados em misturas de concretos de elevado desempenho. (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009)

2.4.3 Dosagem de aditivo

A eficiência do superplastificante não está vinculada apenas com a sua coerência com o cimento, concomitante a isso tem-se de ponderar as técnicas de mistura e transporte, obtidas pela dosagem correta, pelos métodos de incorporação, pelas condições ambientais locais, entre outros.

De acordo com Neville (1997), apesar do aditivo aumentar a densidade potencial da superfície das partículas e durante um certo período de tempo o mesmo seja perdido, sua adição não implicará de forma prejudicial o endurecimento do cimento e a pega do concreto, exceto quando são utilizados na presença de cimentos com baixo teor de C3 A (onde pode ser observado um certo retardamento de pega do sistema). Além disso, tais aditivos não geram efeitos sobre a fluência, módulo de elasticidade e retração, assim como não influenciam na durabilidade do concreto.

Para isso, vários métodos de ensaio foram desenvolvidos e, quando empregados de maneira correta, é viável realizar uma primeira escolha do aditivo a ser utilizado, de modo a definir combinações eficientes e ineficientes. A escolha do superplastificante deve ter como base a relação custo-eficiência alcançada através de confrontos entre as curvas “tempo de escoamento versus dosagem de superplastificante” e através da determinação do ponto de saturação desse aditivo. (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Dessa forma, tendo em vista diversos fatores que influenciam na atuação do superplastificante na presença de um cimento específico, infere-se que a dosagem simples recomendada pelo produtor do aditivo não possui muito significado. Para cada dosagem de mistura e combinação cimento-superplastificante existirá uma dosagem adequada de aditivo.

2.4.4 Empacotamento

No decorrer dos anos, a preocupação pelo empacotamento das partículas amplificou-se nas diversas áreas da engenharia. Explica-se essa preocupação pelo motivo de que uma enorme parte dos materiais industriais ou naturais os quais são utilizados constantemente no dia-a-dia possuem diferentes formas e tamanhos. Nesse contexto, as “partículas” são consideradas como minerais, grãos de agregados, solos, moléculas, poros, metais ou pós químicos ou rochas. Dessa forma, as propriedades das partes que compõem os materiais e as interações entre eles influenciam parcialmente no comportamento dos mesmos. (Stroeven & Stroeven *apud* Castro & Pandolfelli, 2009).

As características físicas, como: distribuição granulométrica, textura superficial das partículas e índice de forma influenciam diretamente na fluidez inicial do concreto.. Dessa forma, maneira com a qual o tamanho das partículas é distribuído é de extrema importância, uma vez que incita o melhor empacotamento e, em conjunto com o fluido, determina as propriedades reológicas do material no decorrer do processo de mistura e no estado fresco (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

O uso de um superplastificante em concretos de alto desempenho incita o aumento da sua densidade devido à diminuição da quantidade de água na mistura. Além disso, constituintes finos e ultrafinos, cujo formato é esférico – adições – vêm sendo adicionados às misturas afim de facilitar o auto-adensamento e promover um melhor preenchimento e compactação dos vazios predominantes entre os grãos, incrementando significativamente a densidade desses materiais. (Sari, Prat & Labastire *apud* Castro & Pandolfelli, 2009).

Assim, o conceito de uma alta densidade de empacotamento pode ser considerado um parâmetro primordial para o alcance de materiais cimentícios de elevada ecoeficiência.

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais

O aglomerante utilizado foi um cimento de alta resistência inicial CPV-ARI-MAX (Brennand cimentos, Sete lagoas, MG), em conformidade com as especificações da NBR 5733 (ABNT, 1991). Esse cimento foi escolhido por se tratar de um produto de elevado grau de pureza, ou seja, com reduzido teor de materiais cimentantes suplementares em sua composição (95-100% clínquer, 0-5% de fíler calcário). As principais propriedades químicas e físicas do cimento empregado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado

Parâmetro	Valor
Conteúdo de MgO, %	1.46
Conteúdo de SO ₃ , %	2.99
Conteúdo de CO ₂ , %	2.42
Resíduos insolúveis, %	0.97
Perda ao fogo, %	3.30
Área específica (Blaine), cm ² /g	4740
Massa específica, g/cm ³	3.04
Início de pega, min.	130
Fim de pega, min.	183
Resistência à compressão (1 / 3 / 7 / 28 dias), MPa	(27.0 / 42.3 / 46.4 / 53.9)

Como agregado miúdo convencional, foi empregada no estudo uma areia natural quartzosa de rio, proveniente da região de Ponte Nova, MG. Na produção dos concretos parametrizados, foi empregado apenas o agregado miúdo separado nas fações retidas nas peneiras 0,15 mm; 0,30 mm; 0,60 mm e 1,18 mm.

Para a produção dos agregados reciclados e dos fílers, foram utilizadas escórias de aciaria, sendo uma do tipo LD (Linz-Donawitz) proveniente de João Monlevade, MG; e uma do tipo AE (arco elétrico) proveniente de Piracicaba, SP. Este material foi recebido e estocado no pátio do Laboratório de Materiais de Construção

Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, onde ficou submetido a processo de intemperização por três anos.

Um aditivo superplastificante (McBauchemie, Powerflow 4000) foi utilizado nesta pesquisa para atuar como redutor de água e melhorar a trabalhabilidade das matrizes produzidas.

3.2 Métodos

3.2.1 Produção dos fílers

Os finos de escória foram produzidos a partir dos agregados miúdos obtidos conforme descrito no item 3.1. Dois fílers com granulometrias distintas foram produzidos: (1) o Fíler Grosseiro (FG), obtido por meio de moagem convencional em moinho de bolas (Marconi, MA500), cuja configuração está apresentada na Tabela 2; e (2) o Fíler Refinado (FR), produzido a partir do fíler grosseiro por meio de moagem adicional em moinho de alta eficiência (Retsch, PM100).

Na tabela 2 e 3 são apresentadas as configurações dos moinhos e parâmetros de moagem.

Tabela 2. Configuração do moinho de bolas empregado na pesquisa

Material (jarro e esferas)	Aço inoxidável
Volume do jarro, cm³	10 367
Volume útil, cm³	3 422
Volume de material por ciclo de moagem, cm³	1 740
Velocidade, rpm	200
Tempo de moagem, min.	180
Esferas (Quantidade / diâmetro, mm)	(7 / 22)
	(17 / 28)
	(34 / 31)
	(11 / 38)
	(16 / 41)

Tabela 3. Configuração do moinho de alta eficiência empregado na pesquisa

Material (jarro e esferas)	Zircônia (YZrO ₂)
Volume do jarro, cm³	250
Volume de material por ciclo de moagem, cm³	80
Velocidade, rpm	400
Tempo de moagem, min.	45
Esferas (Quantidade / diâmetro, mm)	(99 / 10) (191 / 5)

3.2.2 Caracterização química das escórias

A caracterização química das escórias foi feita utilizando a técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX), empregando-se o equipamento PANalytical Epsilon3x, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP. A análise semi-quantativa foi feita empregando-se o banco de dados Omnia constante no software do fabricante do equipamento.

3.2.3 Caracterização granulométrica dos fílers

As distribuições granulométricas dos fílers de escória, bem como do cimento, foram feitas utilizando-se a técnica de difração de laser. O equipamento empregado foi o analisador de partículas Battersizer 2000 e o líquido utilizado foi álcool isopropílico.

3.2.4 Projeto dos traços dos concretos parametrizados

Os concretos foram projetados seguindo uma relação 1:2 em volume (material cimentante : agregado miúdo) de modo a se obter uma massa com alto grau de compactidade, conforme critério de empacotamento empregado baseado no modelo de Andreassen Modificado (ORTEGA, PILEGGI, *et al.*, 1997).

O agregado miúdo empregado na produção dos concretos foi a areia convencional, no entanto, somente as frações retidas nas peneiras de abertura de malha 0,15 mm; 0,30 mm; 0,60 mm e 1,18 mm foram utilizadas. Na composição do volume de agregado miúdo total, cada uma das quatro frações foi utilizada em proporção igual, correspondente a ¼ do volume final de agregado.

Seis traços foram projetados para avaliar o desempenho das misturas cimentantes obtidas com diferentes teores de substituição de cimento por fílers de escória. Adicionalmente, um traço de referência empregando apenas cimento foi produzida para fins de comparação. Na

Tabela 4 são apresentados os traços em volume, com os percentuais dos materiais utilizados.

Os concretos estudados foram produzidos para as condições de máximo empacotamento, empregando-se dosagem ótima de aditivo. Os procedimentos para a obtenção da dosagem de aditivo bem como a determinação da condição de máximo empacotamento são apresentados nos itens 3.2.8 e 3.2.9.

Tabela 4. Traços produzidos na pesquisa com percentuais em volume dos materiais constituintes

Mistura	Fíler Grosseiro (FG)	Cimento Portland (CP)	Fíler Refinado (FR)	Areia fina	Areia média-fina	Areia media grossa	Areia grossa
Ref.	0.0%	33.3%	0.0%	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%
ELD 00-90-10	0.0%	29.9 %	3.3%	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%
ELD 00-80-20	0.0%	26.6%	6.6 %	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%
ELD 20-70-10	6.6%	23.2%	3.3%	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%
ELD 40-50-10	13.3%	16.6%	3.3%	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%
ELD 20-60-20	6.6%	19.9%	6.6%	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%
ELD 40-40-20	13.3%	13.3%	6.6%	16.7%	16.7%	16.7%	16.7%

3.2.5 Dosagem do superplastificante

O conteúdo de superplastificante foi determinado experimentalmente por meio de ensaio de reologia empregando-se um viscosímetro Ford. Esta metodologia foi adaptada do protocolo proposto por Aictin (2000) e o objetivo foi a obtenção do ponto de saturação de aditivo por meio de elaboração de curvas teor de aditivo versus tempo de escoamento. O protocolo foi aplicado a todos os *blends* compostos por cimento e finos de escória, e o conteúdo de aditivo determinado foi utilizado nos estudos de empacotamento. Para a análise fixou-se uma relação água / finos igual a 0,35.

3.2.6 Obtenção da condição de máximo empacotamento das misturas

Uma metodologia experimental adaptada da proposta por Wong e Kwan (WONG e KWAN, 2008; KWAN e WONG, 2008) foi empregada para a determinação da condição de máximo empacotamento aplicada na confecção dos concretos. O protocolo empregado consistiu na determinação da relação água / finos ótima que leva a uma condição de máximo empacotamento conforme metodologia experimental.

3.2.7 Caracterização física e mecânica dos concretos

Foram moldados 6 corpos de prova prismáticos com dimensões (4 x 4 x 16) cm, os quais foram submetidos a ensaio de tração na flexão e compressão, conforme metodologia prescrita pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Os ensaios foram realizados com 7 e 28 dias de idade, sendo três corpos de prova ensaiados por idade.

A caracterização física dos concretos consistiu na determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios, conforme métodos de ensaio prescritos pela NBR 9778 (ABNT, 2005).

3.2.8 Avaliação da ecoeficiência dos concretos

A avaliação da ecoeficiência nesse trabalho é dada através da relação dos seguintes parâmetros: resistência mecânica, consumo de cimento e consumo de rejeito. A partir desses, existe uma correlação entre a resistência mecânica e consumo de cimento que é denominada intensidade de ligante, a qual pode-se analisar a eficiência da quantidade substituição do cimento por fílers de escória no que compete a resistência mecânica (DAMINELI, 2013).

4 Resultados e discussão

4.1 Caracterização física dos agregados convencionais e reciclados

Os agregados naturais apresentaram resultados de massa específica, massa unitária, teor de material pulverulento e teor de umidade em conformidade com os limites prescritos pela NBR 7211 (ABNT, 2005) e coerentes com os dados reportados pela literatura para agregados de mesma composição mineralógica (PETRUCCI,

1998). As escórias apresentaram massa específica e unitária bastante superior comparadas com os agregados naturais, sendo a mais pesada a escória de aciaria AE.

Os resultados estão em concordância com esperado, dada a composição mineralógica das escórias de aciaria, e são coerentes com o reportado pela literatura (PEIXOTO, OLIVEIRA, *et al.*, 2008; GUMIERI, 2002; SANTOS, MARINHO, *et al.*, 2014; DINIZ, FRANCO DE CARVALHO, *et al.*, 2017).. Os resultados obtidos na caracterização física dos agregados convencionais e reciclados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características físicas dos agregados empregados na pesquisa

Material	Areia quartzosa	Escória LD	Escória AE
Massa específica	2,681	3,770	4,520
Massa unitária	1,532	1,945	2,024
Teor de material pulverulento	0,80	3,62	1,22
Teor de umidade	0,18	1,44	0,95

4.2 Caracterização química das escórias

As escórias de aciaria apresentaram teores consideráveis de CaO, Fe₂O₃, SiO₂, MgO, Al₂O₃ e MnO. A escória de aciaria LD apresentou teor de CaO 27,4% maior que o apresentado pela escória AE, o que sugere uma maior presença de silicatos de cálcio nesse material quando comparado com a escória AE. Já o teor de SiO foi maior na escória AE. Os teores de Fe₂O₃ ficaram muito próximos nas duas escórias. O teor de Cr₂O₃ foi maior na escória AE comparada com a escória. Os resultados da análise química das escórias são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados da análise química das escórias estudadas

	Escória LD	Escória AE
SiO ₂	13.4%	18.1%
Al ₂ O ₃	3.6%	6.0%
Fe ₂ O ₃	34.5%	34.2%
CaO	36.2%	28.4%
MgO	5.0%	5.4%
K ₂ O	-	-
Na ₂ O	-	-
SO ₃	0.3%	0.3%
MnO	3.7%	4.0%
Cr ₂ O ₃	0.8%	1.3%
Others	2.5%	2.3%
LOI	1,1%	0,1%

4.3 Granulometria dos fílers de escória

De posse das análises química e física das escórias, elegeu-se a amostra do tipo LD para a produção dos fílers, uma vez que esta apresentou massa específica mais próxima a dos materiais convencionais (produção de concretos de peso convencional) e maior teor de CaO, o que sugere maior presença de silicatos de cálcio e consequente ação cimentante, conforme reportado em literatura (DINIZ, FRANCO DE CARVALHO, *et al.*, 2017).

Os dois fílers produzidos (grosseiro e refinado) apresentaram finuras respectivamente maior e menor que a do cimento estudado, atendendo ao objetivo da etapa. Porém, o fíler refinado não apresentou uma finura tão grande quanto a desejável, não ficando muito diferente da finura apresentada pelo cimento.

Já o fíler refinado apresentou um D90 (diâmetro de partícula cujo percentual de material apresenta diâmetro menor ou igual corresponde a 90%) maior que o do cimento (7,3%), ao passo que os valores referentes ao D50 e ao D10 apresentaram valores menores (28% e 57% respectivamente). O fíler grosseiro apresentou um D10 ligeiramente maior que o do cimento (7%) e valores de D50 e D90 bem maiores (249% e 343% respectivamente).

Com relação a eficiência de moagem do fíler refinado, observou-se uma redução muito significativa das partículas maiores, porém as partículas que já apresentavam

diâmetro reduzido não apresentaram melhoria significativa, de modo que o material apresentou uma distribuição mais uniforme (porém menos uniforme que a do cimento).

De maneira geral o cimento apresentou uma distribuição granulométrica mais uniforme comparada a dos demais finos e a moagem de alta eficiência promoveu uma maior uniformização na granulometria escória. O objetivo de se obter um material com finura maior que a do cimento, e outro com uma finura menor foi alcançado de maneira satisfatória. Os resultados da análise granulométrica são apresentados na Tabela 7 e na Figura 2.

Tabela 7. Parâmetros granulométricos dos finos estudados

Parâmetro	Fíler grosseiro	Cimento	Fíler refinado
D90 (μm)	126,9	36,91	39,59
D50 (μm)	27,23	10,95	8,55
D10 (μm)	1,863	1,743	1,109

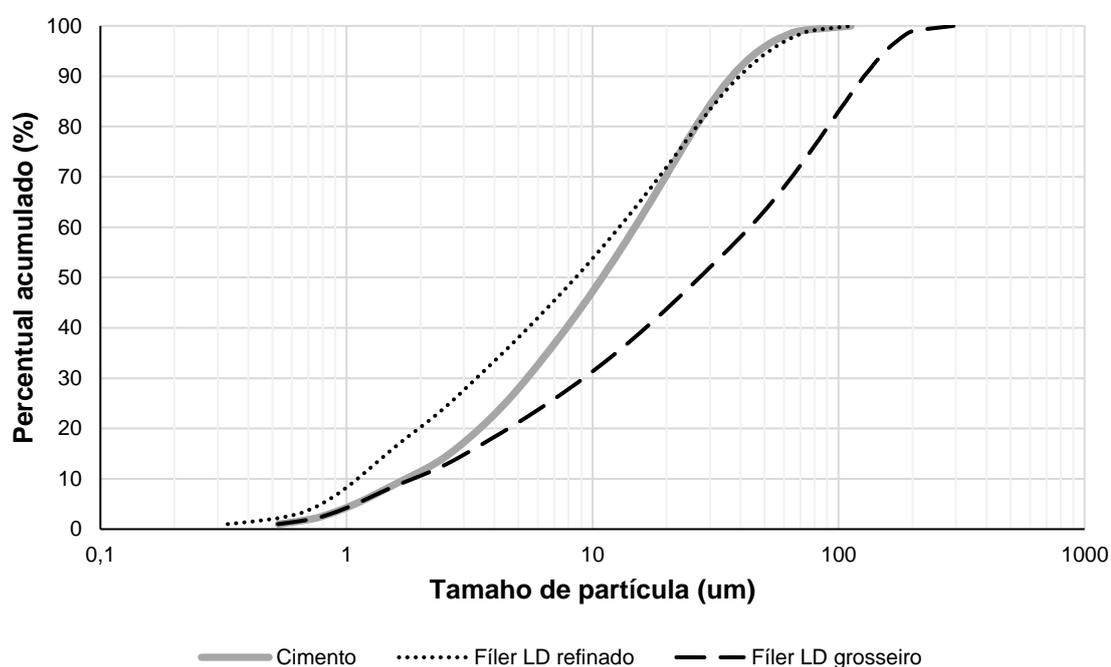


Figura 2. Distribuição granulométrica dos finos utilizados na pesquisa

4.4 Dosagem do superplastificante

Os resultados dos estudos de viscosidade das pastas de cimento para dosagem de plastificante mostraram que as misturas com os maiores teores de substituição de cimento por finos de escória apresentaram menores tempos de escoamento e, portanto, maior eficiência do aditivo. As misturas que apresentaram os menores tempos de escoamento foram as correspondentes a 10% e 20% de substituição de cimento por finos de escória, ao passo que as que apresentaram os maiores tempos foram as com substituição de 50% e 60%. Todas as misturas apresentaram tendência de estabilização mais acentuada a partir da dosagem correspondente a 0,8% de teor de aditivo em relação a massa de finos. Esses resultados apontam para a obtenção de partículas com formato e rugosidade que contribuem para uma maior mobilidade da pasta e indicam uma atuação eficiente do aditivo plastificante nestas partículas. Os resultados dos ensaios de viscosidade são apresentados na Figura 3.

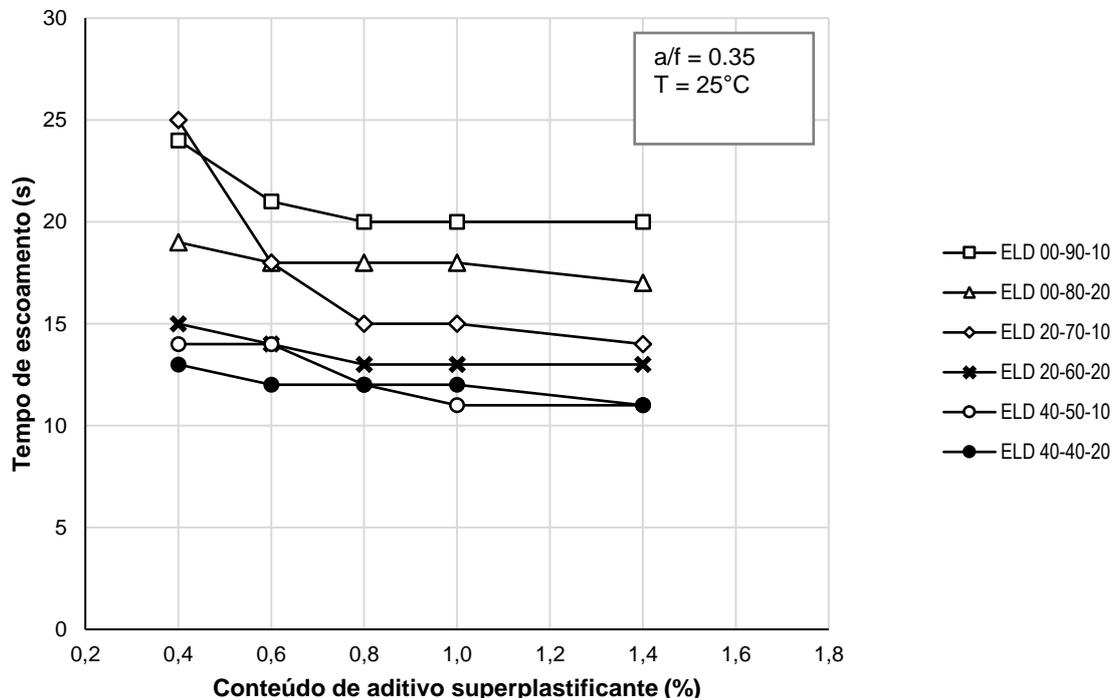


Figura 3. Resultados dos ensaios de viscosidade e dosagem de aditivo

4.5 Grau de empacotamento e determinação da relação água / finos dos concretos

De posse dos resultados dos ensaios de empacotamento das pastas de cimento, apresentados na Figura 4, observou-se que as substituições parciais de 10% e 20% de cimento por finos de escória apresentam resultados muito satisfatórios quando comparados ao concreto de referência. No entanto a mistura que apresentou a maior densidade de empacotamento foi a correspondente a 20% de substituição de cimento por finos e 0,25 de relação água/finos. O grau de empacotamento alcançado por essa mistura foi de aproximadamente 74%, ou seja, 7% maior quando comparado ao concreto de referência.

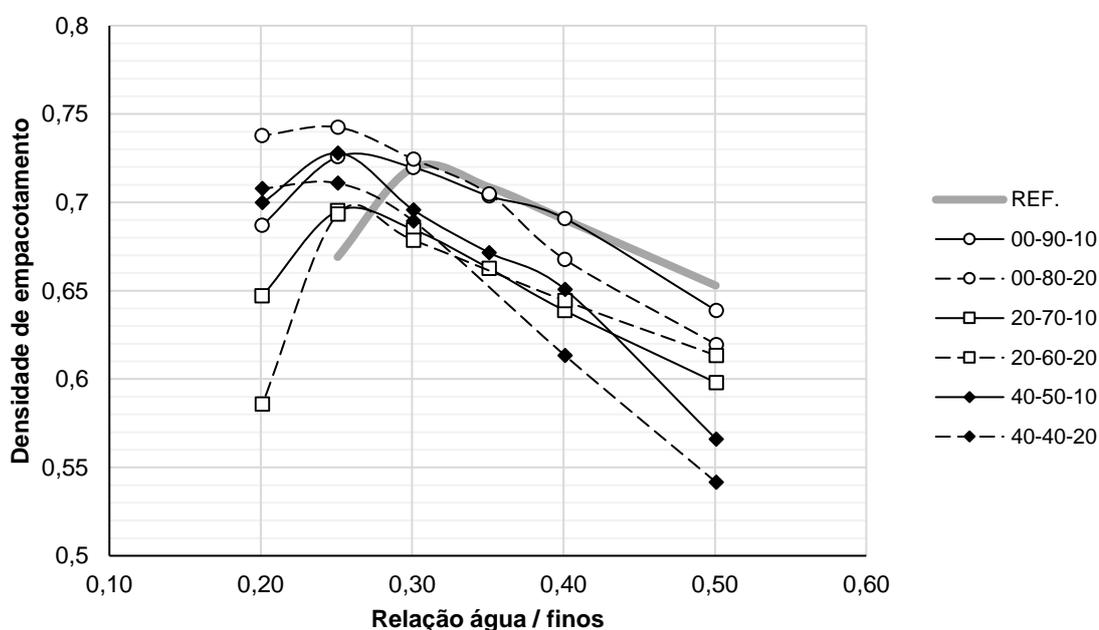


Figura 4. Resultados dos ensaios de empacotamento

4.6 Caracterização mecânica dos concretos

Nos resultados dos ensaios de resistência à compressão, as misturas que apresentaram as maiores resistências mecânicas foram as correspondentes a 10% e 20% de substituição de cimento por finos de escória, porém os quatro concretos com teores de substituição de até 40% apresentaram desempenho mecânico superior à do concreto de referência. O concreto ELD 00-80-10 apresentou a maior resistência à compressão aos 28 dias (109,14 MPa), 16,3% maior que a resistência apresentada

pelo concreto de referência. Porém destaca-se de maneira especial o desempenho do concreto ELD 20-60-20 (103,08 MPa), 9,9% mais resistente que o concreto de referência, mesmo com 40% de substituição de cimento por finos de escória.

O desempenho excelente das misturas se deve em parte à ação cimentante dos finos de escória, conforme já reportado pela literatura (DINIZ, CARVALHO, *et al.*, 2017), no entanto, a ação cimentante esperada da escória é mais lenta e resultados melhores a longo prazo são esperados. Esse comportamento, de certa forma é observado nas diferenças entre os resultados de resistência à compressão com 7 e 28 dias de idade. Embora um comportamento atípico foi observado na mistura ELD 00-90-20, os demais traços apresentaram maiores diferenças entre 7 e 28 dias quando comparados ao concreto sem escória. Os resultados de resistência a compressão e tração na flexão são apresentados respectivamente na Figura 5 e na Figura 6.

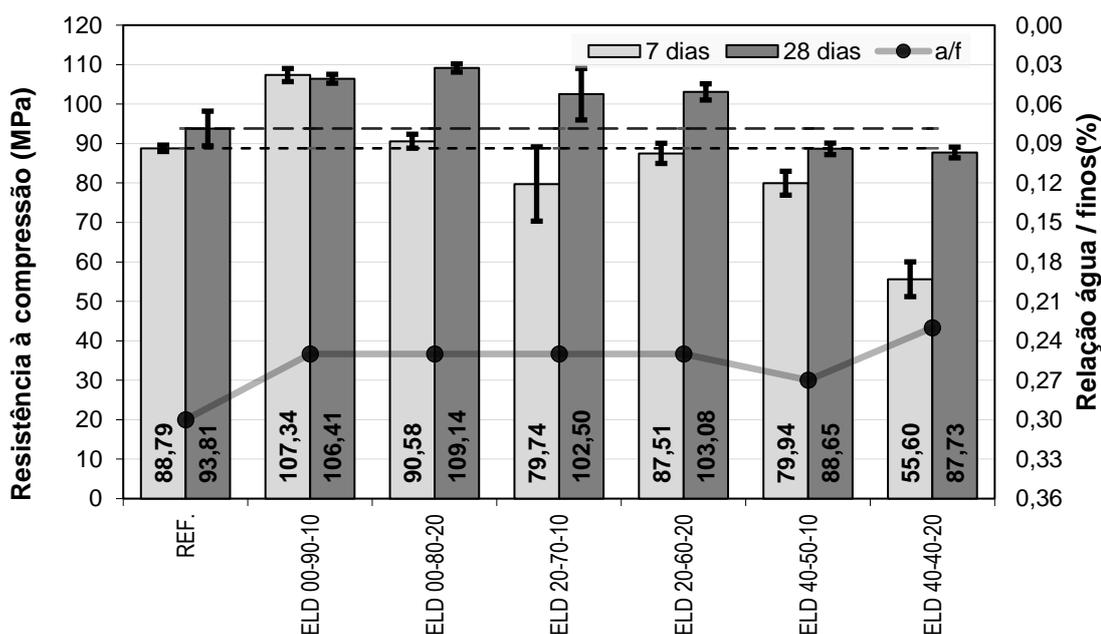


Figura 5. Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos estudados

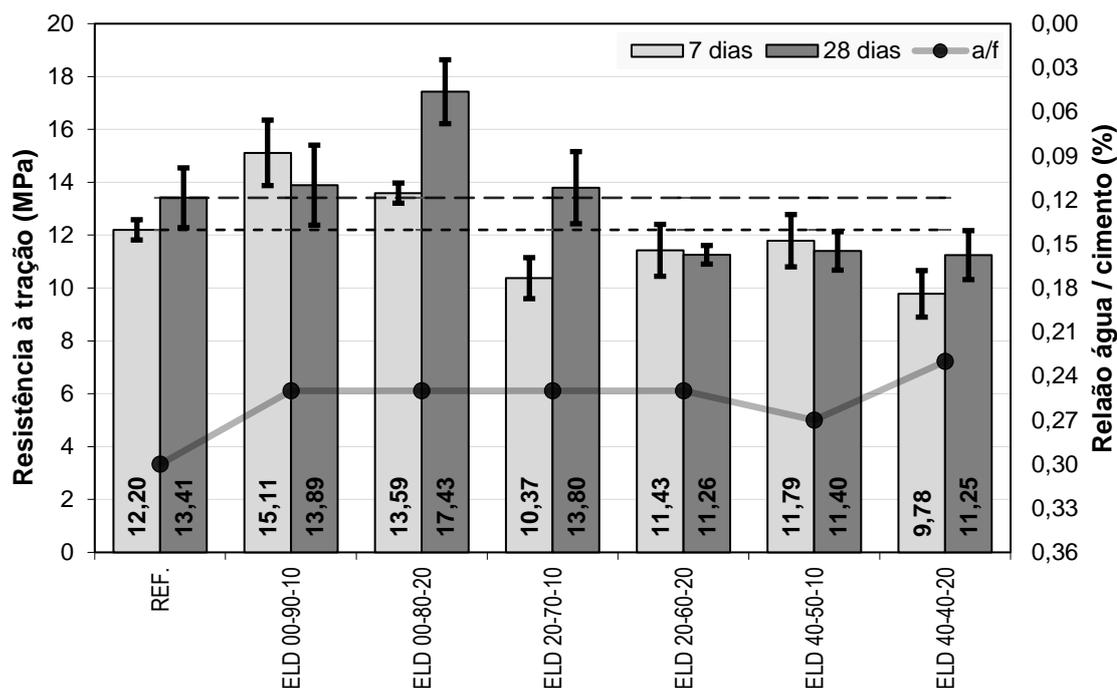


Figura 6. Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos estudados

4.7 Caracterização física dos concretos

No estudo de caracterização física dos concretos foram considerados três parâmetros principais: massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Com os resultados do ensaio de determinação da massa específica do concreto apresentados na Figura 7, pôde-se observar que a ELD 40-50-10 alcançou maior massa específica, ao passo que a ELD 00-90-10 atingiu menor massa específica. Entretanto, todas apresentaram resultados superiores, quando comparadas com o concreto de referência. De maneira geral, com exceção do concreto ELD 20-60-20 que apresentou um comportamento considerado anômalo, o aumento do conteúdo de fíler de escória implicou em aumento de massa específica conforme esperado. O concreto ELD 40-40-20 obteve a segunda maior massa específica, condizendo com seu teor de substituição de cimento por fíler de escória (60%).

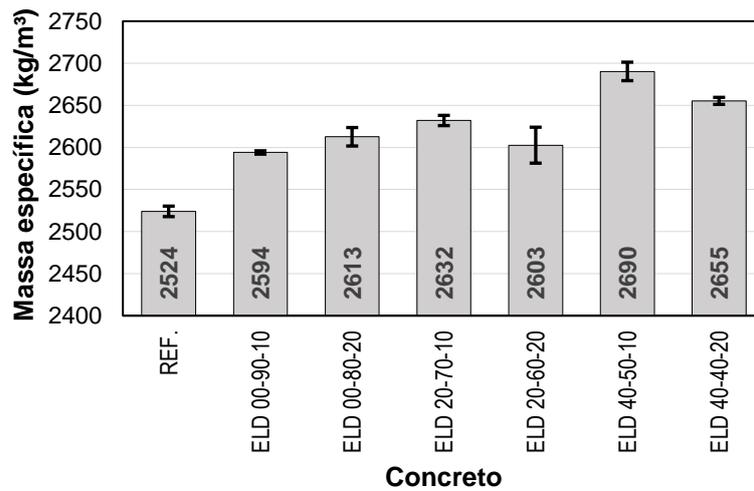


Figura 7. Resultados dos ensaios de determinação da massa específica dos concretos estudados

Os resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios dos concretos mostraram a efetividade do empacotamento das misturas contendo fíler de escória, uma vez que, exceto para o concreto ELD 40-50-10, as demais apresentaram absorção média, e conseqüente índice de vazios médio menores que os observados no concreto de referência. Os resultados dos ensaios de índice de vazios são considerados excelentes e ajudam a explicar o bom desempenho mecânico. Os resultados do ensaio de absorção são apresentados na Figura 8 e os de índice de vazios na Figura 9.

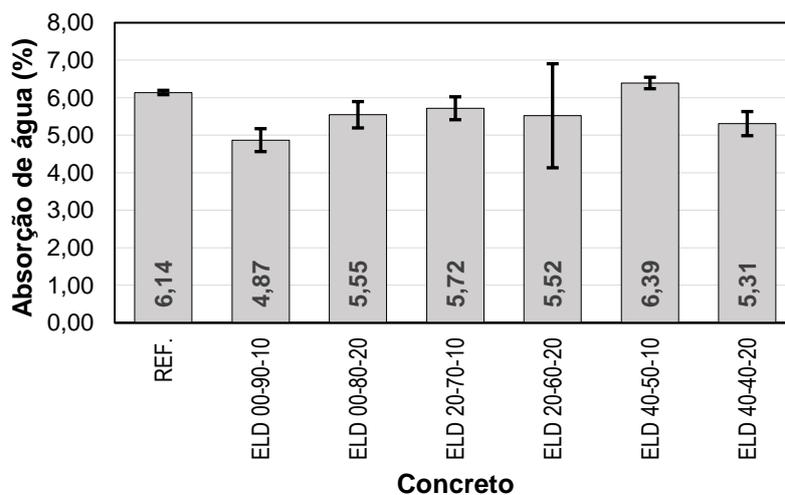


Figura 8. Resultados dos ensaios de absorção de água dos concretos estudados

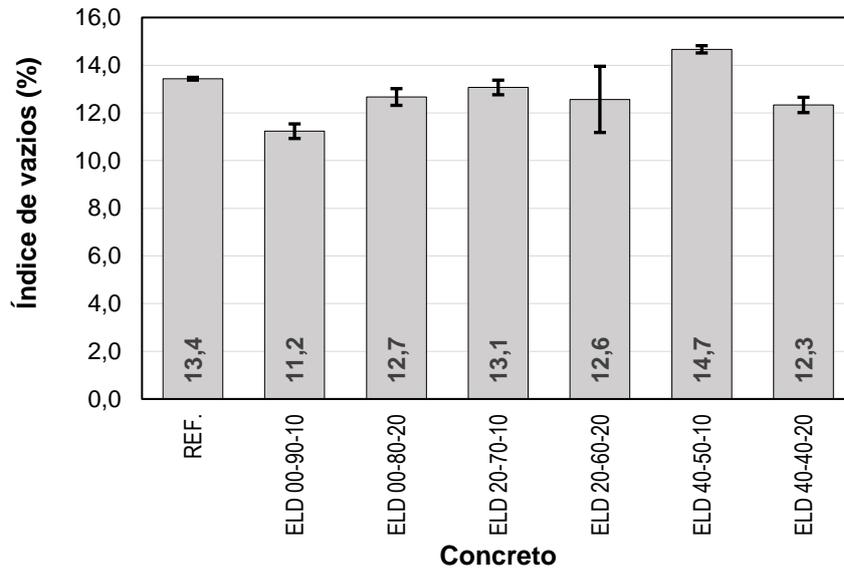


Figura 9. Resultados dos ensaios de índice de vazios dos concretos estudados

Por fim a Figura 10 apresenta algumas imagens da seção transversal, cortada e polida, de alguns concretos selecionados conforme o seguinte critério: referência, maior resistência mecânica, menor porosidade e maior teor de substituição de cimento por finos de escória.



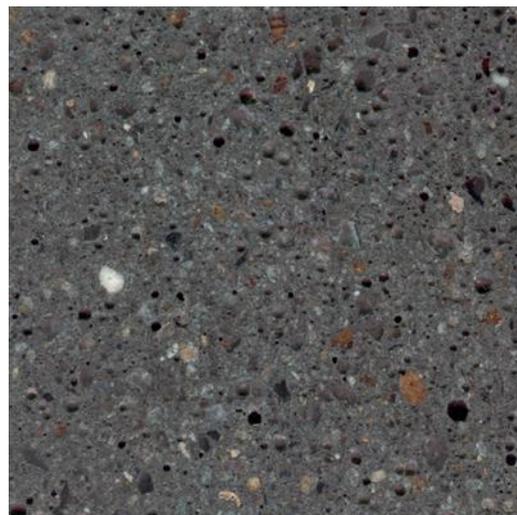
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 10. Imagens da seção transversal cortada e polida de corpos de prova produzidos com algumas argamassas estudadas: (a) concreto de referência; (b) concreto ELD 00-90-10; (c) concreto ELD 00-80-20; (d) concreto ELD 40-40-20

As imagens das seções transversais mostram que os concretos produzidos com substituição parcial de cimento por finos de escória apresentam coloração mais escura que o concreto de referência devido a coloração da escória em comparação com a do cimento. Mesmo com teores baixos de substituição, a tonalidade mais escura fica bastante destacada. Nesse aspecto, o grau de finura do fíler refinado aumenta o potencial de pigmentação, daí a tonalidade mais escura mesmo em baixos teores de substituição.

De modo geral, observam-se matrizes íntegras e coesas, com os grãos de areia plenamente envolvidos pela pasta formada pelos finos de escória e cimento. São percebidas, ainda, algumas poucas bolhas de ar aprisionado durante a moldagem dos corpos de prova, o que não tem relação com deficiências do empacotamento embora sejam computadas como vazios nos ensaios de absorção e índice de vazios.

4.8 Avaliação da Ecoeficiência

Todos os concretos apresentaram bons resultados de intensidade de ligante, inclusive o de referência, de forma que com o aumento do teor de escória, as intensidades de ligante reduziram para todas as misturas.

Os melhores resultados foram observados para o traço 40-40-20, uma vez que sua intensidade de ligante apresentou-se baixa. Ponderando a quantidade de substituição de cimento na sua mistura, infere-se que a competência mecânica do concreto se mantém adequada mesmo com a elevada quantidade de fílers de escória. Além disso, quanto menor a intensidade de ligante, maior consumo de rejeitos, implicando em melhores resultados de ecoeficiência.

Tabela 8. Avaliação da ecoeficiência dos concretos estudados

Traço do Concreto	Consumo de cimento (kg/m³)	Intensidade de Ligante (kg/m³/MPa)	Consumo de rejeito (kg/m³)
REF.	771.5	8.22	0
ELD 00-90-10	719.8	6.76	99.1
ELD 00-80-20	636.8	5.83	197.5
ELD 20-70-10	554.4	5.41	294.7
ELD 20-60-20	473.0	4.59	391.1
ELD 40-50-10	388.9	4.39	481.9
ELD 40-40-20	317.9	3.62	591.4

5 Conclusão

Os finos de escória produzidos por processo de moagem convencional e moagem de alta eficiência atingiram graus de finura satisfatórios para os objetivos da pesquisa, sendo que o fíler grosseiro apresentou-se com finura reduzida comparada com a do cimento, ao passo que o fíler refinado apresentou finura superior, atendendo a intenção de se obter materiais que contribuíssem para um aumento do grau de empacotamento quando misturados. Os parâmetros D50 alcançados do fíler refinado, cimento e fíler grosseiro foram respectivamente 8,55 µm; 10,25 µm; e 27,23 µm.

Os traços elaborados se mostraram adequados para os propósitos da pesquisa, permitindo a produção de concreto densamente empacotados e facilitando a comparação entre resultados obtidos por matrizes com diferentes graus de substituição de cimento pelos finos produzidos. Os graus de substituição variaram entre 10% e 60% em volume, sendo que o fíler refinado foi utilizado em teores de 10% e 20%.

Os protocolos de dosagem de aditivo e determinação do consumo ótimo de água se mostraram efetivos e tecnicamente viáveis, levando a informações precisas e relevantes na dosagem dos concretos.

Os concretos produzidos se mostraram mecanicamente competentes, sendo que em teores de substituição de até 40%, todos os resultados excederam os apresentados pelo concreto de referência, que apresentou 93,81 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. O melhor resultado mecânico global foi obtido pelo concreto com 20% de substituição (109,14 MPa) ao passo que a maior eficiência do ligante foi apresentado pelo concreto com 60% de substituição, que apresentou uma resistência à compressão aos 28 dias de 87,73 MPa para um consumo de cimento de 325 kg/m³ (eficiência de 0,269 MPa por kg de cimento). Este último resultado é de particular importância pelo aspecto de sustentabilidade que apresenta, uma vez que permitiu elevado consumo de material reciclado e ao mesmo tempo redução de emissões de gases de efeito estufa associados ao processo de fabricação do cimento.

Os resultados de caracterização física mostraram que as matrizes obtidas apresentaram reduzida absorção de água e índice de vazios, confirmando a eficiência do empacotamento, além de apresentarem aspecto íntegro e coeso com tonalidade mais escura que a matriz de referência.

Por fim, a avaliação da ecoeficiência demonstra com clareza a garantia da competência mecânica dos concretos com substituição de cimento por fílers, confirmando o fato de que a utilização da escória de aciaria na elaboração de concretos é uma ação economicamente, sustentavelmente e tecnicamente adequada.

6 Referências

ABCP. **Indústria Brasileira do Cimento - Base para a Construção do Desenvolvimento**. Brasília: [s.n.], 2012. Encontro da Indústria para a Sustentabilidade.

ABETRE. **Abetre - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes**, 2016. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/imprensa/noticias-abetre/destinacao-irregular-de-residuos>>. Acesso em: 15 Junho 2017.

ABIROCHAS. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais - Informe 01/2017**. ABIROCHAS - Associação Brasileira das Indústrias de Rochas Ornamentais. Brasília, p. 13. 2017.

ABM. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Panorama do Setor Siderúrgico. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 2008. Disponível em: <Fonte:http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_18_16_42_43_32042.pdf>.

ABNT. **NBR 5733**: High early strength Portland cement - Specification. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards - ABNT, 1991.

ABNT. **NBR11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

ABNT. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.

ABNT. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ABNT. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 7211**: Agregado para concreto - especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

ABNT. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ABNT. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

AITCIN, P. C. **High performance concrete**. São Paulo: PINI, 2000.

ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. D. **Manual de Agregados para a Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 228 p.

ASTM. **ASTM C 494**: standard specification for chemical admixtures for. [S.I.]: American Society for Testing and Materials, 1992.

BACCIN, A. G. C. **Fundamentos do Concreto de Alto Desempenho e sua Aplicação no Projeto de Pilares**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1998.

BALTAZAR, R. P. Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação. **Locus UFV**, 21 fev. 2001. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7724>>.

BARROS, et al. Blocos de Escória de Aciaria para Alvenaria Estrutural. In: _____ **Anais do XXII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Ouro Preto**. [S.I.]: UFOP, 2014. p. 1.

BELLOTE, A. F. J. et al. Resíduos da Indústria de Celulose em Plantios Florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, p. 99-106, Jul/Dez 1998. ISSN 37.

BERGAMIN, F. N. et al. **Resíduo de fábrica de papel e celulose: lixo ou produto?** Seminário sobre o uso de resíduos industriais e urbanos em florestaas. Botucatu: UNESP. 1994. p. 97-120.

BERNARDO, A. C. D. S. M.; SILVA, J. D. **Estudo do Calor de Formação nas Etapas de Produção do Cimento Portland com Mineralizadores.** Campina Grande: UNIFEI, 2010. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - Instituto de Engenharia Mecânica – IEM.

CASCUDO. Action of carbonation on concrete. In: ISAIA, G. C. **Concrete: Science and Technology.** São Paulo: IBRACON, 2011. p. 849-886.

CASTRO, A. L. D.; PANDOLFELLI, V. C. **Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.

CASTRO, H. F. D. **Processos Químicos Industriais II - Papel e Celulose.** Lorena: USP, 2009. 30 p. Escola de Engenharia de Lorena.

CENIBRA. **Relatório de Sustentabilidade 2015.** CENIBRA - Celulose Nipo-Brasileira S/A. [S.l.], p. 105. 2016.

CENTURIONE, S. L. **Influência das Características das Matérias-Primas no Processo de Sinterização do Clínquer Portland.** Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 154. 1993.

DAMINELI, B. L. **CONCEITOS PARA FORMULAÇÃO DE CONCRETOS COM BAIXO.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical. **Journal of materials in civil engineering**, v. 29, Maio 2017. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/dissertao__dayse_diniz.pdf>. Acesso em: 18 Maio 2017.

DINIZ, D. H. et al. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical. **Journal of materials in civil engineering**, v. 29, Maio 2017. Disponível em: <http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/dissertao__dayse_diniz.pdf>. Acesso em: 18 Maio 2017.

ELKHADIRI, I. et al. Obtención de cementos belíticos de sulfoaluminatos a partir de residuos industriales. **Materiales de Construcción**, v. 53, p. 57-69, 2003.

FERRETTI, M. Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais. **Revista CPC**, São Paulo, v. 7, p. 74-98, 2008.

FRANCKLIN JUNIOR, I. **Estudo tecnológico em rejeitos de quartzitos do sudoeste de Minas Gerais para utilização com agregado graúdo no concreto**. Uberlândia: UFU, 2009. Tese de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia da Engenharia, 2002. 132 p.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

GOBBO, A. L. **Aplicação da Difração de Raios X e Método de Rietveld no estudo de Cimento Portland**. São Paulo: USP, 2009. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrologia.

GOMES, A.; PINTO, A. P. F.; PINTO, B. **Cimento Portland e Adições**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

GONÇALVES, D. R. et al. Evaluation of the economic feasibility of processing plant for steelmaking slag. **Waste & Management**, v. 34, n. 2, p. 107-120, 2016.

GONÇALVES, D. R. R. **Análise de viabilidade econômica via simulação de monte carlo para utilização de escória de aciaria como agregado na fabricação de pré-fabricados para a construção civil**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

GULLICHEN, J.; FOGELHOLN, C. J. **Chemical pulping in Papermaking science and technology - Book 6**. Helsinki: Fapet, 2000. 693 p.

GUMIERI, A. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese de Doutorado.

HERNANDEZ, R. A. C.; CORTÉS, C. M. P.; BUSTOS, L. P. Durability and acoustics of concrete with slag of cupola furnace as fine aggregate replacement. **Tecnura**, v. 19, n. 43, p. 37 -51, 2015.

HEWLETT, P. O. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4th. ed. [S.l.]: Elsevier, 2004.

IAB. **Instituto Aço Brasil**, 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>>. Acesso em: 15 Junho 2017.

IAB. Processo siderúrgico. **Instituto Aço Brasil - IAB**, 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 17 Maio 2017.

IABR. Sustentabilidade. **Instituto Aço Brasil**, 2014. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/reciclagem.asp>>.

IACOBESCU, R. I. et al. Valorisation of electric arc furnace steel slag as raw material for low energy belite cements. **Journal of Hazardous Materials**, p. 287-294, 2011.

IBS. Produção de aço bruto por processo de refino. **Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS)**, 2008. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,ibs-producao-de-aco-no-pais-cai-0-2-em-2008,313750>>.

IBS. Produção de aço bruto por processo de refino. **INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA** -, 12 abril 2009.

IPEA. Lei nº 12.305/2010. **Política nacional de Resíduos sólidos**, 22 junho 2010a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.html>.

JENKINS, R.; R.W., G.; GEDCKE, D. **Quantitative X-ray Spectrometry**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995.

JESUS, V. G. et al. Habitações Sustentáveis Construídas a Partir de Elementos Construtivos Produzidos com Resíduos de Escória de Aciaria. In: _____ **Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto**. 53º. ed. Florianópolis: IBRACON, 2011. p. 1

- 10. Disponível em:

<http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/HABITAcOES_SUSTENTaVEIS.pdf>. Acesso em: 17 Maio 2017.

JOHN, V. M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: _____ **Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil**. São Paulo: [s.n.], 1996. p. 21-31.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: PCC - USP, 2000. Tese (livre docência) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

JOHN, V. M. Reciclagem de Resíduos na construção Civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento, São Paulo, p. 102, 2000.

JURAS, I. D. A. G. M. **Os impactos da indústria no meio ambiente**. Consultoria Legislativa - Câmara dos Deputados. Brasília. 2015.

KALYONCU, R. S. Slag -Iron and Steel. **Geological Survey Minerals Yearbook**, 2000. Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/790400.pdf>.

KIHARA, Y.; MARCIANO JR., E. **Qualidade e produtividade na indústria do cimento**. [S.l.]: ABESC, 1995. Informativo ABESC.

KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, 2002.

KWAN, A. K. H.; WONG, H. H. C. Packing density of cementitious materials: part 2 - packing and flow of OPC + PFA + CSF. **Materiais and Structures**, v. 41, p. 773-784, 2008.

LIMA, E. S. **Utilização de resíduo grits na fabricação de celulose pelo processo kraft como agregado graúdo para concreto**. Coronel Fabriciano: Unileste, 2010. Tese de Mestrado - Programa de Mestrado em Engenharia Industrial - Centro Universitário do Leste de Minas Gerais.

LODI, V. H. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó - SC**. Florianópolis: UFSC,

2006. 131 p. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

LTDA, V. S. <http://www.siderurgicaitabirito.com.br>. **Siderurgica Itabirito**, 2012.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo: USP, 2000. 135 p. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MARCA AMBIENTAL. <http://www.marcaambiental.com.br>. **Marca Ambiental**, 2014.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. Tese.

MASURERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. Use of electric arc furnace slags as addition. In: _____ **National seminar in solid waste reuse/recycling**. São Paulo: [s.n.], 2000. Disponível em: <<ftp://ftp.cefetes.br/Cursos/MetalurgiaMateriais/Joseroberto/P%D3S/NORMAS,%20ARTIGOS%20E%20%20EXERC%20CICIOS/ACIARIA%20EL%C9TRICA.pdf>>.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIDER, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, 04 jun. 2012. 21.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. ed. [S.l.]: Nicole Pagan Hasparyk, 2014. 782 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: microstructure, properties and materials**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, M. A. Boletim Jurídico, 2008. Disponível em: <<http://www.boletimjuridico.com.br/doutrina/texto.asp?id=2459>>. Acesso em: 17 Maio 2017.

MENDES, B. C. et al. **Produção de Clínquer Belítico a partir de Resíduos das Indústrias de Celulose e Granito**. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindóia: UFV. 2016.

MODOLO, R. C. E. **Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil**. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2006. Tese de Mestrado - Universidade de Aveiro.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. **SCIELO**, 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v62n2/v62n2a14.pdf>>.

NACIONAL. **Certificado de ensaios em cimento**. Companhia Nacional de Cimento. Sete Lagoas. 2016.

NASCIMENTO, K. Â. L. D. **Utilização da escória proveniente da reciclagem do aço em concreto de cimento Portland**. São Carlos: Instituto de Física e Química da Universidade de São Paulo, 2007. Dissertação do Instituto de Física e Química da Universidade de São Paulo.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, T. N.; PEIXOTO, R. A. F.; ALVES, V. D. J. G. Comportamento de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para alvenarias. **Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (RECICLOS)**, 2007. Disponível em: <<http://www.acquacon.com.br/cobesa/apresentacoes/pap/pap002027.pdf>>.

ORTEGA, F. S. et al. Influência dos modelos de Alfred e Andreassen sobre a microestrutura e densidade averde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica**, v. 43, p. 183-189, 1997.

PEIXOTO, R. A. F. et al. Viability study for production of concrete using recycled siderurgy residue. **ACI Materials Journal**, v. 1, p. 145-155, 2008.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação**. Vitória: UFES, 2004. 152 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Espírito Santos.

PEREIRA, R. S.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B. Aplicação de misturas solo-grits em estradas florestais: resistência mecânica via CBR. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, p. 619-627, jul./ago. 2006. ISSN 4.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

PETRUCCI, E. G. R. **Portland cement concrete**. 13th. ed. São Paulo: Globo, 1998.

PINHEIRO, M. L. et al. Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de grits. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, Abril/Junho 2013.

PINTO, S. D. J. F. **Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves**. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2005. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro - Universidade de Aveiro.

REHAN, R.; NEHDI, M. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. **Environmental Science & Policy**, v. 8, p. 105-114, 2005.

RIZZO, E. M. S. **Curso Introdução aos Processos Siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia - ABM, 2006.

ROBERTO, F. A. D. C. **Balanço Mineral Brasileiro**. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Ceará, p. 13. 2001.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. Porto Alegre: Rio Grande do Sul, 2012.

ROSLAN, N. H. et al. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 16 - 24, 2016.

SANTOS, C. Brasília lidera fornecimento de rochas ornamentais. **Manutenção & Tecnologia**, n. 189, Abril 2015.

SANTOS, D. H. D. **Ecomassa**: Argamassas mistas produzidas com estéril de mineração. Ouro Preto: UFOP, 2015. 136 p. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SANTOS, D. H. D. et al. Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para uso em alvenaria modular. In: _____ **Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto**. Natal: IBRACON, 2014. p. 1 - 16.

SILVA, C. A. F. E.; BUENO, J. M.; NEVES, R. A indústria de celulose e papel no Brasil. **Celulose e Papel**, v. 2015-2016, p. 20-32, 2015.

SILVA, J. O. **Contrato Nº 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de Estudos para a Elaboração Duodecenal (2010-2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. J.Mendo Consultoria. [S.l.], p. 68. 2009.

SILVA, R. J. **Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland**. Campinas: UNICAMP, 1994. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas.

SOUZA, B. P. D. **Aderência de barras de aço tipo CA em concreto sustentável**. Ouro Preto: UFOP, 2015. 97 p. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SOUZA, T. I.; CARDOSO, A. V. . **Utilização de resíduos sólidos da indústria de celulose kraft na fabricação de cimento; caracterização físico-química**. 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto de Galinhas: [s.n.]. 2008.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry Academic Press**. London: [s.n.], 1990. 10-69 p.

THOMAZ, E. O que caracteriza o concreto de alto desempenho, qual é sua aplicação e como o mercado tem usado essa alternativa? **Téchne**, 2016. Disponível em: <<https://techne.pini.com.br/2016/07/o-que-caracteriza-o-concreto-de-alto-desempenho-qual-e-sua-aplicacao-e-como-o-mercado-tem-usado-essa-alternativa/>>.

TOCCHETTO, M. R. L. Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais, 23 maio 2005. Disponível em: <<http://www.blogdocancado.com/wp-content/uploads/2012/04/gerenciamento-de-residuos-solidos-industriais.pdf>>.

TOFOLLO, R. V. M. **Pavimentos Sustentáveis**. Ouro Preto: UFOP, 2015. 107 p. Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

TOULOUEVSKI, Y. N.; ZINUROV, I. Y. **Innovation in Electric Arc**. Ontario - Canada: Springer, 2010. 260 p.

TRIPATHI, B.; CHAUDHARY, S. Performance based on evaluation of ISF slag as substitute of natural sand in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 672-683, 2016.

TRIPATHI, B.; CHAUDHARY, S. Performance based on evaluation of ISF slag as substitute of natural sand in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 672-683, 2016.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 1 - measurement using a wet packing method. **Materials and structures**, v. 41, p. 689-701, 2008.

WORRELL, E. et al. Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. **Annual Review Energy and the Environment**, v. 26, p. 303-329, 2001.

ZHANG, T. et al. Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 56, p. 48-55, 2011.